

новлено, что коэффициент теплопроводности покрытия в диапазоне температур  $+20 \div 60$  °С составляет 0,12 Вт/(м·К), а степень черноты покрытия – 0,36.

### Список использованных источников

1. Центр теплоизоляции. Жидкие теплоизоляционные покрытия: каталог. Режим доступа: <http://tutteplo.ru/catalog> (дата обращения: 11.03.2011).
2. Теплоизоляционные свойства покрытия. Сверхтонкая теплоизоляция «Корунд». Режим доступа: [http://nano34.ru/var/mini\\_price/494.pdf](http://nano34.ru/var/mini_price/494.pdf). (дата обращения: 25.03.2011).
3. Композиция теплоизоляционная жидкая ТСС. ООО ТД "УкрИзоПром": статьи. Режим доступа: [http://www.tcceramic.com.ua/articles.php?news\\_id=32](http://www.tcceramic.com.ua/articles.php?news_id=32). (дата обращения: 02.04.2011).
4. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1979. 319 с.

УДК 669.014

**В. Н. Гуцин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев**

Нижегородский государственный технический университет  
имени Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ НА КАЧЕСТВО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

### Аннотация

*Рассмотрено влияние скорости подвода расплава в промежуточный ковш на интенсивность вихреобразования на мениске и ее влияние на степень загрязненности литого металла неметаллическими включениями.*

*Ключевые слова: промежуточный ковш, вихревые образования, потоки расплава, неметаллические включения.*

Целью работы являлось определение условий образования вихревых образований на поверхности расплава в промежуточных ковшах и влияние их интенсивности на степень загрязненности металла неметаллическими включениями.

На физических моделях были проведены серии опытов подвода расплава в промковши через защитные трубы (глубина погружения 150 мм) с выходными отверстиями диаметром 110 мм при скоростях истечения струи расплава  $w_0=0,6 \dots 1,7$  м/с.

Разливка в прямоугольный 50 т промковш с высотой налива жидкого металла 750 мм дает симметричную картину раскрытия струи расплава. В центральном сечении (вдоль большой оси, рис. 1, а) это четырех вихревая структура с максимальными скоростями гидропотоков в сечениях II, IV в соответствии с отливаемыми непрерывнолитыми заготовками с

максимальными скоростями большого нижнего вихря на уровне 0,121; 0,159 и 0,198 м/с между точками 2 и 4.

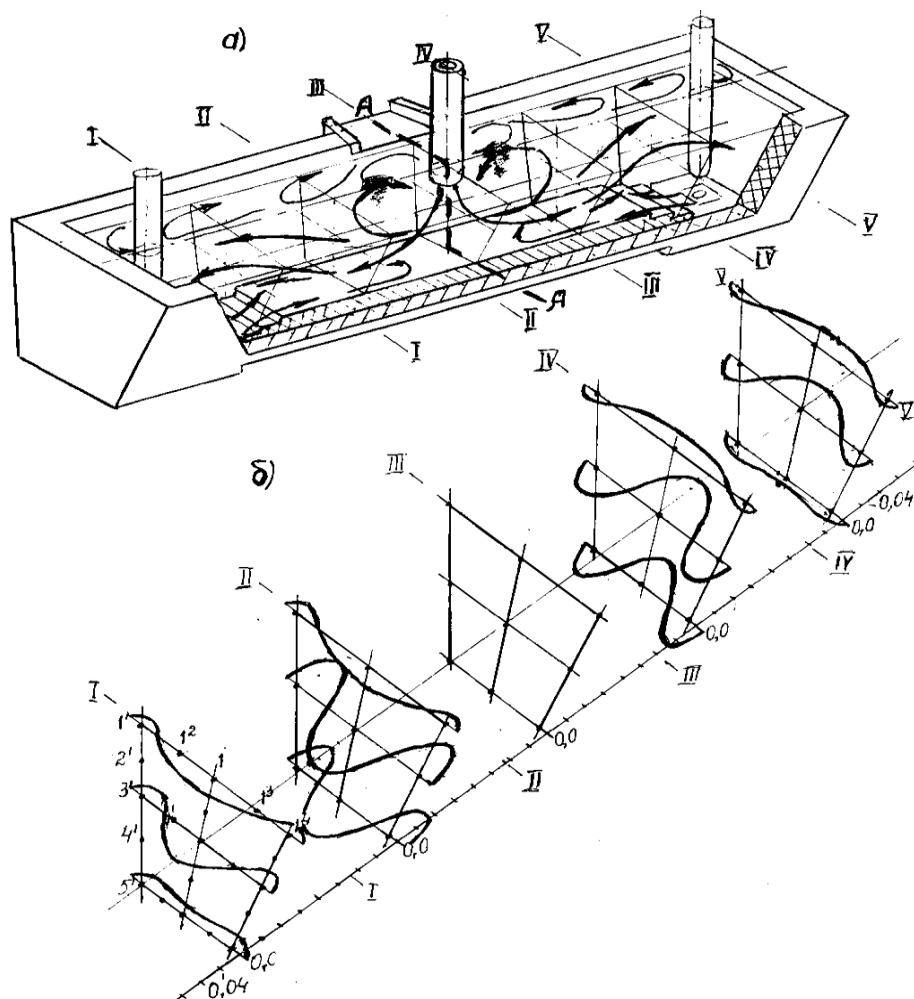


Рис. 1. Схемы распространения гидротоков в объеме 50 т промковша (а) и эпюры скоростей в реперных сечениях на трех горизонтальных плоскостях (б) при скорости истечения расплава из защитной трубы 1,0 м/с

У торцевых стенок ковша гидротоки большого вихря направляются вниз к днищу со скоростями на уровне 0,03; 0,05 и 0,08 м/с, что способствует затягиванию примесных образований из «застойной зоны» в районе поворота вихря. К преимущественному горизонтальному движению гидротоков в большом вихре между точками 2 и 4 добавляются также нисходящие потоки между сечениями I–II (IV–V), что препятствует всплыванию примесных образований от дна к мениску. Распределение их в этом объеме равномерное с небольшими скоростями всплывания. Значительная часть этих образований затягивается в разливочные стаканы донными потоками и попадает в кристаллизаторы.

Малый верхний вихрь имеет обратное направление движения по отношению к большому со скоростями не ниже, соответственно, 0,16; 0,19 и 0,24 м/с.

Именно в этом районе отмечается максимальное количество возникающих конусообразных вихрей активно затягивающих с мениска в ванну неметаллические включения (НВ). Начальная скорость вращения на мениске этих образований может достигать несколько десятков метров в секунду при быстром падении до полного их исчезновения. При этом верти-

кальные скорости потоков направленных вниз воронки, примерно на порядок ниже скоростей вращения (рис. 2) [1].

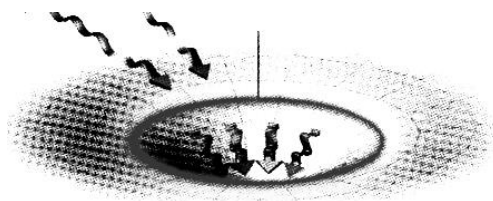


Рис. 2. Схематическое изображение вихревого образования с направлением миграции шлака

Возникающие многочисленные менее интенсивные вихри не распространяются на глубину более 55–65 мм. Интенсивность этих вихрей быстро убывает к торцам промковша, где наблюдается скопление НВ.

Конусообразные вихри с учетом эффекта Мажуса в первом приближении описывается следующими параметрами [1–3]:

$$\Gamma = -2\pi\omega R^2 \text{ – интенсивность вихря;} \quad (1)$$

$$\Phi = \omega R^2 \varphi \text{ – потенциал скорости } (0 \leq \varphi \leq 2\pi); \quad (2)$$

$$\psi = -\omega R^2 \ln r \text{ – функция тока } (0 \leq r \leq R); \quad (3)$$

$$r = \nu \Delta r \text{ – линия тока (по высоте конуса } H); \quad (4)$$

$$\text{grad } p = \rho_{\text{ж}} \omega^2 R^4 (r/r^4) \text{ – градиент давления;} \quad (5)$$

$$F_3 = \rho_{\text{ж}} \Gamma \omega H \text{ – сила затягивания примеси с мениска;} \quad (6)$$

$$N_3 = F_3 \omega \text{ – мощность вихря;} \quad (7)$$

$$\omega_3 = \omega / \sqrt[6]{\text{Re}} \text{ – скорость затягивания примесных образований,} \quad (8)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения вихря;  $R$  – радиус вихря у основания на мениске;  $\varphi$  – угол поворота;  $H$  – высота вихря;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность расплава.

Расчеты по этой схеме требуют сведений о скоростных и геометрических параметрах образующихся вихрей, которые можно получить на физических моделях [1–3].

В табл. 1 и 2 приведены параметры вихревых образований для промежуточных ковшей емкостью 30 и 50 т, полученные при различных скоростях истечения расплава из защитной трубы.

На рис. 3 приведены результаты расчета мощности вихрей по данным моделирования и экспериментальных замеров уровня загрязненности литого металла при различных скоростях подвода расплава в промежуточные ковши емкостью 30 и 50 т.

Из приведенных данных видно, что с увеличением скорости поступления струи в жидкую ванну вихреобразование значительно активизируется, особенно при  $\omega_0 > 1,0$  м/с. С увеличением вместимости промковша наблюдается некоторое снижение параметров вихревых образований и в меньшей мере частота их возникновения.

Таблица 1

Параметры вихревых образований в 30 т ковшах при различных скоростях истечения струи расплава в жидкую ванну

Скорость истечения $\omega_0$ , м/с	Средние скорости гидропотоков на мениске вокруг трубы $\omega_M$ , м/с	Длина волны колебаний струи $\lambda$ , м	Частота возникновения вихрей, 1/с	Частота вращения вихря, 1/с	Радиус основания конуса вихря, мм	Высота конуса вихря, мм
0,60	0,049	0,016	1,8–1,9	2–3 (3,1)*	65–75	55–65
1,00	0,081	0,019	2,0–2,1	3–4 (4,3)*	80–100	70–80
1,35	0,120	0,025	2,2–2,3	4–5 (4,8)*	120–145	155–215
1,70	0,152	0,030	2,4–2,6	5–6 (5,1)*	165–185	235–295

\* – расчетные данные

Таблица 2

Параметры вихревых образований в 50 т ковшах при различных скоростях истечения струи расплава в жидкую ванну

Скорость истечения $\omega_0$ , м/с	Средние скорости гидропотоков на мениске вокруг трубы $\omega_M$ , м/с	Длина волны колебаний струи $\lambda$ , м	Частота возникновения вихрей, 1/с	Частота вращения вихря, 1/с	Радиус основания конуса вихря, мм	Высота конуса вихря, мм
0,60	0,038	0,014	1,7–1,8	2–3 (2,7)*	60–70	50–55
1,00	0,061	0,018	1,9–2,0	3–4 (3,2)*	75–90	65–70
1,35	0,105	0,024	2,1–2,2	4–5 (4,1)*	110–135	140–200
1,70	0,138	0,028	2,3–2,4	5–6 (4,9)*	155–170	195–245

\* – расчетные данные

Образовавшиеся вихри активно засасывают с мениска шлак и другие НВ, которые впоследствии попадают в объем жидкой ванны.

Как видно из рис. 3, тенденции интенсификации вихрей при увеличении скоростей подачи в промежуточные ковши расплава и увеличение загрязненности литого металла близки. Причем с увеличением емкости ковша и интенсивности вихрей и индекс загрязненности литого металла снижается, что говорит об улучшении рафинирующей способности ковшей большей емкости.



Рис. 3. Зависимость от скорости истечения струи расплава из защитной трубы мощности вихреобразований для ковшей емкостью 30 т (1) и 50 т (2) и индекса загрязненности литого металла НВ заготовок сечением 250х1500 мм (промковши емкостью: 3 – 30 т, 4 – 50 т; •, ○ – экспериментальные данные)

Для единичного объема расплава вибрирующей струи в защитной трубе второй закон Ньютона можно записать в виде

$$F = \rho_{жс} \cdot \partial^2 y / \partial \tau^2, \quad (9)$$

где  $F$  – сила,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\partial^2 y / \partial \tau^2$  – ускорение выбранного объема.

Сила, действующая на единицу объема цилиндрической струи радиусом  $r_0$  в радиальном направлении, обусловлена перепадом давления в этом направлении:

$$F = -\partial p / \partial \tau \cong K \Delta P / \lambda, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Давление, созданное деформированной поверхностью жидкости, выражается формулой Лапласа:

$$\Delta P = P - P_a = \sigma \cdot (1/R_1 + 1/R_2) = \sigma \cdot A \cdot (4\pi^2 / \lambda^2 - 1/r_0^2), \quad (11)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности;

$R_1 = r_0 + A$  и  $R_2 = (2\pi)^2 \cdot A / \lambda^2$ ;  $r_0$  – первоначальный радиус струи,  $A$  – амплитуда колебаний.

Коэффициент роста волны (или затухания) равен [3]

$$\alpha = \sqrt{\frac{K\sigma}{\rho_{жс} \cdot r_0^2 \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{4\pi^2 \cdot r_0^2}{\lambda^2}\right)}, \quad (12)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (расплава),  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости (расплава),  $\lambda$  – длина волны колебаний.

При разливке стали струя жидкого металла вследствие сопротивления воздуха, действия силы тяжести и внутренних сил, вызываемых вихревым и волновым движением жидкости, может деформироваться и при определенных условиях распадаться. В струе образуются как минимум два участка: сплошной участок устойчивого состояния; вибрирующий участок, в котором появляются нарушения. Третий – разорванный участок, в котором струя распадается на капли, появляется только в случае распространения ее на воздухе.

Состояние струи при разливке влияет на захват воздуха, вторичное окисление стали, содержание НВ, склонность к образованию плен, характер затопленной струи в жидкой ванне.

Изучение процесса течения жидкости показывает, что формирование сплошного и вибрирующего участков в общем случае зависит: от давления перед стаканом  $P$ , поверхностного натяжения  $\sigma$ , вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$ , формы и размеров стакана разливочной трубы.

Длина волны неустойчивых возмущений (колебаний радиуса струи) равна

$$\lambda \cong A \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} \cdot d_c^2}{8\sigma}}, \quad (13)$$

а длина сплошного участка

$$\alpha = A \omega_0 \sqrt{\rho_{\text{ж}} \cdot d_c / \sigma}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $d_c$  – диаметр струи на выходе из отверстия;  $\omega_0$  – скорость течения струи;  $A$  – эмпирический коэффициент,  $A=0,006-0,03$ , зависит от статического давления, формы канала и т. д.

При  $\rho_{\text{ж}}=7000 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_c=0,11 \text{ м}$ ,  $\sigma=1,8 \text{ Дж/м}^2$  имеет  $\lambda = (1,4 - 4,3) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , а при  $\omega_0=1,0-1,7 \text{ м/с}$   $\alpha=144-1000 \text{ мм}$ . Таким образом, при длине защитной трубы более 1 м струя расплава поступает в промковш в распадающемся виде, что приводит к возникновению завихрений в расплаве и образованию конусообразных вихрей.

## Вывод

Увеличение объема разливочного ковша, снижение высоты падения струи расплава и использование вихрегасящих устройств [4] позволяют снизить интенсивность вихреобразования и загрязненность литого металла вредными примесями.

## Список использованных источников

1. Гущин В. Н. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок: монография / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2006. – 141 с.
2. Скворцов А. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, В. А. Ульянов. – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.
3. Ульянов В. А. Внепечная обработка и разливка стали: монография / В. А. Ульянов [и др.]. – Н.Новгород: НГТУ, 2008. – 129 с.

4. Гуцин В. Н. Технические решения по управлению потоками расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гуцин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев // *Металлург*. 2010. № 9. – С. 45–47.

УДК 669.051

**Е. Г. Дмитриева, Е. В. Братыгин, Д. С. Пешкин**

ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ АГЛОШИХТЫ И КАЧЕСТВО АГЛОМЕРАТА**

### **Аннотация**

*В статье представлены результаты исследований процессов окомкования и агломерации железорудного концентрата месторождения Тебинбулак, Узбекистан. Рассмотрено влияние основности шихты и содержания твердого топлива в ней на газопроницаемость слоя и качество агломерата. Представлено новое выражение для расчета коэффициента газодинамического сопротивления шихты, которое позволяет оценить качество окомкования и производительность агломерационной установки. Установлено, что при изменении содержания твердого топлива от 60,0 до 65,0 кг/т агломерата и основности от 2,0 до 2,4 повышение  $C_{ш}$  приводит к снижению газопроницаемости, а  $B$  – к увеличению. Получены регрессионные уравнения для сопротивления слоя и качества агломерата. Таким образом, приведенный в работе метод расчета коэффициента газопроницаемости позволяет оценить влияние различных факторов на агломерацию.*

*Ключевые слова: железорудный концентрат, месторождение Тебинбулак, агломерация, окомкование, спекание, качество агломерата, газопроницаемость, основность.*

### **Abstract**

*In article results of researches of pelletizations and sintering of iron ore concentrate from Tebinbulak, Uzbekistan. The influence of basicity of charge and content of solid fuel in it on the permeability of the layer and the quality of agglomerate. Presents a new expression for calculation of the gas-dynamic coefficient of resistance of a charge that has allowed to evaluate the quality of work and productivity of the sintering plant. It is established that the change of the content of solid fuel from 60,0 to 65,0 kg/t of sinter and basicity from 2,0 to 2,4 improving  $C_{sh}$  leads to decreasing of  $B$  and to increase. The obtained regression equations for the resistance of the layer and quality of agglomerate. Thus, resulted in the method of calculation of the coefficient of permeability allows to estimate the influence of different factors on agglomeration.*

*Keywords: iron ore concentrate, Tebinbulak, sintering, quality of agglomerate, permeability of the layer, basicity.*

Известно, что на сегодняшний день агломерационный процесс является самым производительным и экономичным способом получения офлюсованного сырья для доменной